

# 自然資本と人工資本の長期代替可能性に 関するエコロジー経済学的一考察

— An Ecological Economic Consideration on the long-run  
Substitutability between Natural Capital and Human-made Capital

大 橋 迪 男  
Oohashi, Michio

## ABSTRACT

This paper describes the outline of the opinion insisted by an ecological economist named P. Lawn. From the viewpoint of ecological economics, he insisted that human-made capital is not an adequate long-run substitute for natural capital. At first he criticizes that some CES production function analyses have the disadvantage of being unable to satisfy the thermodynamic rules. Then he introduces the Bergstrom production function to prove the complementary relation between human-capital and natural capital. As the final policy implication his study points out the importance of “Strong Sustainability”.

## 1. はじめに

先の論文<sup>(1)</sup>においては、オーストラリアのエコロジー経済学者 P. Lawn の著作をとりあげて、環境制約をとり込んだ IS - LM モデル分析の図解を紹介した。環境の制約条件とそれをクリアーする技術革新の様子を主流派経済学のマクロ均衡分析の中にとり入れるものであった。

他方でエコロジー経済学者は、資源・環境問題の重要性を指摘することを役割の一つとしてしているため、存在する自然環境を「自然資本」と呼び機械設

---

(1) 拙稿 [1] 参照

備などの「人工資本」human-made capital と区別した上でその経済的役割を明らかにすることを研究課題としている。さまざまな資本ストックやフローのサービスと生産量との関係は、これまでの経済学において生産関数分析として研究されてきているため、エコロジー経済学による前述の研究課題の追求は伝統的・生産関数分析についての再検討をうながすことになる。

本論文においては再び P. Lawn の著作<sup>(2)</sup>にもとづいて、長期的経済成長プロセスにおいて人工資本がどこまで自然資本の代替物たりうるのかという課題についての分析をとりあげて検討する。以下の論文の構成は次の通りである。第2節においては、「自然資本」と「人工資本」の代替性をめぐる研究と論争がふりかえってまとめられる。第3節においては、生産関数における物的生産可能性とエコロジストの主張する熱力学の第一、第二法則との関連について述べられる。第4節においては、生態学の視点から眺めた時現実的となる生産関数がそなえるべき特性を列挙している。第5節においては、伝統的な経済分析において用いられる CES 型生産関数を取りあげて、それがはらんでいる理論的問題点を指摘する。第6節では、前述した CES 型生産関数の持つ問題点をクリアーした新しい生産関数、Bergstrom 型生産関数が提示される。第7節においては、「人工資本」と「自然資本」は通常の経済学のように長期代替的關係にあるのではなく、むしろ補完的關係にあるというエコロジー経済学の主張がとりあげられた上で資源政策に対する含意が検討される。

## 2. 「自然資本」の役割をめぐるこれまでの論争

P. Lawn によれば、「自然資本」が果たす経済的役割と自然資源の稀少性についての問題意識の高まりは古く 1798 年の T.Malthus の著作にさかのぼるとされる。それ以降もその重要性についてはしばしばふれられてきたのであるが、最初の大規模な実証的研究は 1963 年の Barnett と Morse によるものであるとされ

(2) この論文は P. Lawn [2] Chapter3 に大きく依存してその紹介・検討をおこなっている。

(3) T.Malthus [3] 参照

る。資源の稀少性をあらわす尺度として抽出された資源生産物の単位費用に注目することによって、彼らは 1870 年から 1957 年までの期間についてアメリカでは自然資源の供給は全体として豊かになっていると述べている。彼らのこの結論を否定するわけではないが、その後 Smith は彼らの研究の理論的・実証的問題点を提出した上で、資源稀少性の尺度として資源価格と単位抽出費用を用いることの問題点をも指摘している。

1960 年代後半から 1970 年代初期における「成長の限界」に対する社会的関心の高まりの中で、実質生産力の成長に対する「自然資本」の役割の重要性を強調する 2 つの研究——Meadows et.al<sup>(4)</sup> [1972] と Nordhaus & Tobin [1972] が同時に発表された。通常「ローマクラブ・レポート」と呼ばれる報告書の中で、Meadows らは将来の経済成長に対する生態学的制約とこれを乗り越える技術革新の潜在的可能性についてシステム・ダイナミックスの手法を用いることによって予測した。彼らのモデル分析はまさに人類の「最後の審判」をも暗示するものである。その結論によれば、人類がこのまゝのスピードで経済活動を押し進めていくなれば「自然資源」のストックに決定的な枯渇が間もなくもたらされてしまうため、それを避けるためにも実質生産力の成長を停止することが必要となるのである。もちろん、この「ローマクラブ・レポート」の主張に対しては多くの批判が投げかけられてきた。多くの経済学者は、同レポートはさし迫る資源の稀少化を示すシグナルとなる資源価格のはたらきを軽視していること、そしてそのはたらきによって資源節約的な技術進歩が誘発開発されると共により豊富な資源に向けた代替が進んでいくと批判したのである。

こうした批判をより具体化するために、Nordhaus と Tobin は 1972 年に「自然資本」に対する「人工資本」の代替弾力性を求める計量経済学的分析をおこなった。彼らの方法は、代替弾力性が一定の数値をとるという CES 型生産関数を用いた実証研究であった。言うまでもなく経済学における代替弾力性とは、「自然資本」と「人工資本」の相対価格が 1% 変化することによって相対的な物的投

(4) Meadows et.al [4] 参照

入量の何%の変化が生みだされるかを表わす数量的尺度であり、換言すれば投入資源相対価格比の変化によって生まれる物的資本量の相対投入量の変化に波及する一種の価格感応度にほかならない。この Nordhaus と Tobin の実証研究によれば、1909 年から 1958 年のアメリカ経済についての代替弾力性は十分大きな値であっておよそ 2 に等しいと計測されるので、この分析にもとづいて資源ストックはアメリカの実質生産力に対する足枷になってはいないと結論しているのである。さらに彼らの結論を補強するかたちで、Solow<sup>(5)</sup> は 1974 年のアメリカ経済学会における講演の中で「人工資本」による「自然資本」の代替可能性の大きさについて言及し、消費の持続可能性を維持するために自然資源のレント（余剰利益）が再投資されることを強調した。こうした代替可能性の問題は、1974 年の Stiglitz による枯渇性資源の最適減少率の研究や、Hartwick による自然資源のレントの再投資に関する数学的法則へと発展させられていった。

こうした代替可能性に関する研究にともなって、エコロジー経済学者 Daly と Georgescu-Roegen は「自然資本」と「人工資本」代替可能性を評価するにあたって CES 型生産関数を用いることは不適切であると主張した。その理由は、CES 型生産関数によっては熱力学の第一、第二法則に従う生産活動という物的変換プロセスが十分に表現されないというものである。こうした批判を継承する形で P. Lawn は、エコロジー経済学者 Daly と Georgescu-Roegen の分析を一層進め、「自然資本」と「人工資本」とは代替物ではなく補完的関係にあること、そして経済活動が生態学的に持続可能であるためには「自然資本」のミニマムな水準が維持保全される必要があることを積極的に提示するのである。そこで次節では、P. Lawn らのエコロジー経済学の出発点となっている物的生産における経済活動と熱力学の第一、第二法則の関係について述べておこう。

### 3. 物的生産可能性と熱力学の第一、第二法則

これまでの経済学においては、物的財貨の産出と労働や人工資本など生産財

(5) Solow [6] 参照

の投入との間の数量的関係は貨幣単位で測られた生産関数によって表現されてきており、生産関数の本質はある範囲での投入によって物的に実現可能となる生産可能性の大きさを数学的に示すことにあった。けれども空を飛ぶ飛行の可能性を数学的に記述しようとする時重力の法則が考慮されなければならないように、生産プロセスの技術的可能性を示す生産関数は物的変換過程を支配する基本的物理法則に従うものでなければならないのである。その物理学の自然法則とは熱力学の第一、第二法則の2つであり、これらの法則の経済学とのかかわりについてはこれまで何人かの経済学者によって検討されてきた。

熱力学の第一法則とは、別名エネルギー・物質保存の法則とも呼ばれる。この法則によれば、エネルギーと物質は決して新しく創りだされたり破壊されたりすることがないのである。かくして第一法則は、有限性の条件を提示するのである。他方、第二法則はエントロピーの法則とも呼ばれている。この法則によれば、物理的変換過程でエネルギーが使用される時には、利用可能である、又は利用しうるエネルギー量は常に減少していくのである。第一法則が生産や生態系の活動によってエネルギーと物質のある所与の量が維持されていることを主張するのに対して、エントロピーの法則はエネルギーが利用可能となる形態を決定するのである。それ故物理学の観点から先ず注目されなければならないのは、物質、エネルギーの全体量の大きさではなく、既に利用可能な形態で存在している量の大きさであることが物的変換過程を考える時に留意されねばならないのである。これらの法則によれば、全ての物理的変換過程のいとなみは利用可能なエネルギーの非可逆的損失、すなわち時には「エントロピーの純赤字」と呼ばれる作用を含むのである。ここで「低エントロピー」と「高エントロピー」という言葉の区別について述べておこう。「低エントロピー」とは、すぐに利用可能な形態でエネルギーと物質が体化されて、高度に秩序化された物理的構造を意味している。これとは逆に「高エントロピー」とは、そのまゝでは利用可能とはならない形態でエネルギーと物質が高度に無秩序な状態である物理的構造を指している。定義そのものによって、経済過程で用いられるいかなる物質・

エネルギーも低エントロピーな資源なのであり、他方において経済過程で利用可能とならない副産物は高エントロピーな廃棄物と考えられるのである。

ここで、熱力学の第一、第二法則が経済学における生産関数によって示される物的生産可能性に対して持っている含意を以下の4点にまとめておこう。

第1には、生産過程における最終財に体化されている物質・エネルギーの大きさは、生産過程で用いられる資源に体化されていた物質・エネルギーの大きさよりも必ず小さくならなければならないのである。換言すれば、生産過程で用いられる資源に体化された低エントロピーの物質・エネルギーの一部分は最終的に高エントロピーの廃棄物を生みださざるをえないのである。かくして、100%の生産効率というような生産変換プロセスは決してありえない。より正確に言えば、低エントロピーの物質、エネルギーのうちどれだけ廃棄されるかという割合は、経済システムにおける資源配分メカニズムがもたらす技術的・経済的効率性の大きさにも依存していることが注目されねばならない。生産技術の進歩が生まれるならば、投入資源に体化された物質・エネルギーのより少ない比率が高エントロピーの廃棄物となって、より大きな比率が最終財となるのである。かくして、熱力学上の限界に達するまでの間は、同一の投入資源量からより多くの財貨生産が潜在的に可能となっていくと考えられる。

第2には、前述したように100%の資源リサイクルが不可能であることである。少なからず多くのエコノミストが資本の代替可能性をめぐる論争の中で、熱力学の第一法則にのみ注目してリサイクル技術の進歩に期待すれば低エントロピー資源のストックの持続的減少が相殺されうるという間違った信念を持つにいったことを思いおこせば、この含意はとりわけ重要である。そもそも、もし100%の物質・エネルギーのリサイクルが実現され実質生産水準が維持される循環型社会に向かっているとすれば、低エントロピー資源・エネルギーの大きさに社会的関心が向けられたりすることはないのである。

第3には、ひとたび前述の熱力学上の限界が達成されてしまえば、実質生産水準は低エントロピー資源の利用可能量に全く完全に依存することになってしま

い、さらには究極的に自然資本の存在量に依存することになる。実際には多くの資源を最終財に変換するプロセスで、熱力学上の限界とはるか遠くへだたった他点にあるとしても、追加的な技術進歩はいずれ困難さを増していき、達成のためのコストも上昇していくであろうと予想しておかねばならない。同時に高エントロピー廃棄物を減らすという成果の達成もより困難性を増していくであろう。それ故に、自然資本の利用可能ストックに依存して望ましい生産水準を実現する経済活動にとって熱力学上の限界に直面することは不可避なのである。

第4には、実際の経済プロセスにおいて真の投入物は低エントロピーの物質・エネルギーなのであり、「究極の資源」 ultimate resource<sup>(6)</sup>である。エコロジー経済学者は、生産における本質的ともいえる重要性にもかかわらず、労働や人工資本は単なる資源変換作用をうながす要因にすぎず、それら自体が生みだされ維持されていくためには低エントロピー資源が必要不可欠であると力説するのである。またこの物理法則にのっとり彼らは、高エントロピー廃棄物こそ経済過程の真の産出物であるとも主張する。あたかも最終財が産出物ではないとも言うようである。彼らエコロジー経済学者によれば、経済過程を生産局面と消費局面の2段階に区別する時、最終財は生産局面では産出物を構成しても消費局面では投入物にほかならないからである。生産局面において同時に結合生産された高エントロピー廃棄物は、消費局面において究極の生産物として自然界の環境に回帰すると考えられるのである。

#### 4. より実動的な生産関数が備えるべき諸特性

生産関数を用いて生産要素間の代替（又は補完）関係の可能性をテクニカルに分析するにあたっては、これまでの考察から生産関数が次に述べる特性を備えていなければならないとエコロジー経済学者は主張する。

その第1条件は、熱力学の第一、第二法則を満たすことである。

---

(6) 低エントロピー資源を自然資本として人工資本から区別することは実際上はなかなか困難であると考えられる。



第2条件は、高エントロピー廃棄物の発生量を減らすような技術進歩の役割が含まれており、言い換えれば一定の資源フローから生まれる実質生産水準の増加が見込まれていることである。

第3条件は、低エントロピー資源が真の投入物とみなされていることである。

先ず第1の特性について考えてみよう。いま、生産プロセスの技術効率を次のように定義する。

$$E = Q/R \quad (1)$$

但し、 $Q$  = 物質、エネルギー量の大きさを測られた実質生産水準、 $R$  = 投入資源に体化された物質・エネルギーの大きさを測られた低エントロピー資源の投入量である。このように定義する時、投入資源量や人的資本の大きさにかかわらず、生産関数の技術効率  $E$  が1より小さい値を持つことが第1の特性となるのである。

そして第2の生産関数の特性は、技術進歩によって  $E$  の値の増加が生まれるようではなければならない。

最後に生産関数の第3の特性は、低エントロピー資源が生産プロセスの真の投入物となっていなければならないため、実質生産水準  $Q$  が投入資源水準  $R$  を何倍かにした乗数として表わされるものでなければならない。

このような3つの特性をそなえた生産関数を図示するため、実現可能な等生産量曲線を  $I_1$ 、実現できない等生産量曲線を  $I_2$  とし、 $K$  は資源変換作用を持つ人工資本ストックの大きさを示すものとする。言うまでもなく等生産量曲線とは、同一の生産量を生みだすために必要となる低エントロピー資源投入量  $R$  と資源変換作用を持つ人工資本  $K$  との間での様々な組合せをあらわすような曲線である。技術進歩によって生産水準  $Q$  が大きくなればなる程、原点に対して凸の等生産量曲線が原点から離れて右上へシフトしていくことは、通常のミクロ経済学の生産理論と全く同じである。

図1に示されるように、投入資源量  $R$  はある実質生産水準  $Q_0$  を生産するために必要とされる最小資源量  $R_{\min}$  で示されるようなある漸近線を持っていると考



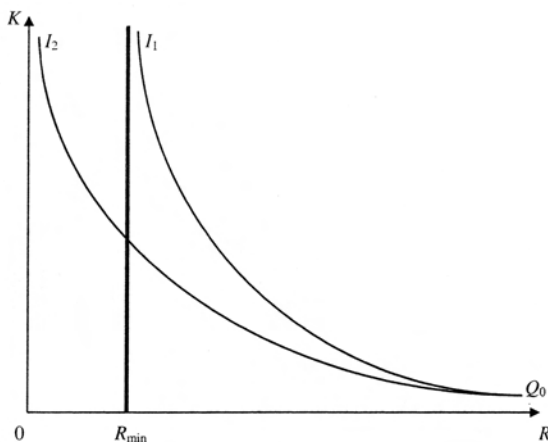


図 1 物理的に実現可能な等生産量曲線と実現不可能な等生産量曲線

出所 文献〔2〕P.46

えられる。こうした自然資本の最低限必要となる水準を示す漸近線を導入することによって、等生産量曲線  $I_1$  はその曲線上の全ての組合せはこの漸近線よりも必ず右側になければならないのであり、その意味で「実現可能な」等生産量曲線と呼ばれるのである。投入資源を示す横軸上で漸近線によって示されるミニマムレベルが存在することによって第一法則が示され、同一等生産量曲線上を左方向へ移動することによって自然資本が減少し人工資本が増加するというエントロピー増大のプロセスが表わされているという意味で第二法則も満たされているのである。 $I_2$  のような資源投入の最小必要量を下まわって漸近線  $R_{\min}$  より左側に位置するような等生産量曲線は、熱力学の 2 法則を満たされないという意味で、「実現不可能」とみなされる。

図 2 においては、技術進歩が生じる時の 3 本の「実現可能な」等生産量曲線が  $Q_0$  が示されている。いかなる時点においても投入資源の最小必要量は生産技術の状態によって決まると考えられるため、技術進歩が生じる時資源投入に関する漸近線は  $R_{\min 1}$  から  $R_{\min 2}$  へ、そしてさらに  $R_{\min}$  へと左方へシフトしていくと考えられる。この図 2 では、漸近線  $R_{\min}$  が  $E = 1$  となる熱力学上の限界をあ

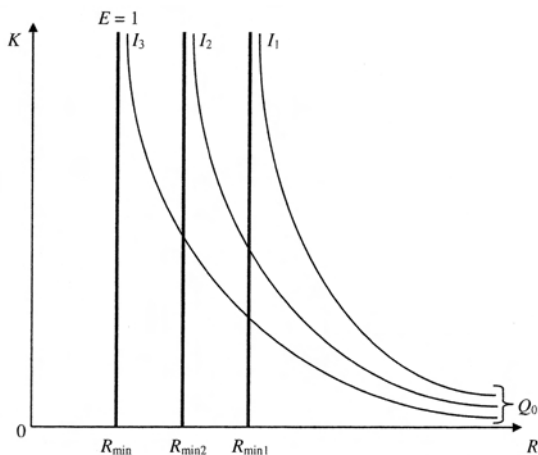


図 2. 物理的に実現可能な等生産量曲線と技術進歩

出所 文献〔2〕P.47

らわしていることになる。ひとたびこの熱力学上の限界に到達してしまえば、もはやそれ以上の資源節約的技術進歩の実現は不可能となって投入資源に関する漸近線ももうそれ以上左方向へシフトすることはなくなるのである。

技術進歩によって資源投入の漸近線が左方へとシフトしていくならば、同一生産水準  $Q_0$  を生みだす投入資源と人工資本との「実現可能な」組合せをあらわす等生産量曲線も同じように左方向へとシフトしていくのである。即ち、 $I_1$  から  $I_2$  へ、そして  $I_3$  へのシフトが実現する。かくして  $R_{\min}$  と  $I_3$  が到達されれば、実質生産水準  $Q_0$  は自然資本のストックを不変に保ったまま維持実現されていくことになる。技術進歩がいきつくしたこの時には、実質生産水準の拡大は自然資本の増加、換言すれば自然資本の自己再生能力と廃棄物に対する自浄能力に完全に依存することになるのである。

## 5. CES 型生産関数による分析の問題点

次に CES 型生産関数による分析が、これまで述べてきた生産関数の「実現可能性」となる特性を満たしているかどうか、そして生産要素間の代替可能性を

どの程度満足させるものであるかについて検討をおこなう。

よく知られているように CES 型生産関数は次のように示すことができる。

$$Q(K, R) = \gamma[\alpha \cdot R^{-\rho} + (1-\alpha) \cdot k^{-\rho}]^{-\frac{1}{\rho}} \quad (2)$$

但し

$Q$  = 生産量水準に体化されている物質・エネルギーの大きさを測られた実質生産量の水準

$K$  = 工場、機械設備などの生産財に労働力を含めて表示した人工資本量の水準

$R$  = 生産に用いられる自然資源に体化された物質・エネルギーの大きさを測られた低エントロピー資源量の水準

$\gamma$  = 生産技術のレベルを示す技術パラメーター

$\alpha$  = 低エントロピー資源投入の生産弾力性

$(1-\alpha)$  = 人工資本の生産弾力性

$\rho$  = 代替性の大きさを示すパラメーター

この CES 型生産関数において、自然資本と人工資本の代替の弾力性  $\sigma$  は次のように示すことができる。

$$\sigma = 1/(1+\rho) \quad (3)$$

これを書き直して

$$-\rho = (\sigma-1)/\sigma \quad (4)$$

(4) 式を (2) 式に代入して

$$Q(K, R) = \gamma[\alpha \cdot R^{\frac{(\sigma-1)}{\sigma}} + (1-\alpha) \cdot K^{\frac{(\sigma-1)}{\sigma}}] \quad (5)$$

これを整理して

$$\alpha \cdot R^{(\sigma-1)/\sigma} = (Q/\gamma)^{(\sigma-1)/\sigma} - (1-\alpha) \cdot K^{(\sigma-1)/\sigma} \quad (6)$$

この (6) 式にもとづいて、代替弾力性  $\sigma$  の値に関する 2 つのケースを区別して夫々の場合における生産関数の熱力学的な実現可能性を検討しておこう。

(a) のケース：K が時間と共に増加するが代替の弾力性が 1 より小さいため長期の代替関係が不十分であるケース。即ち  $\sigma < 1$

(b) のケース：K が時間と共に増加するが代替の弾力性が 1 より大きくて長期的に適切な代替関係が生まれるケース。即ち  $\sigma > 1$

(a) のケースにおいて、 $K$  が増加し無限大に近づく時、(6) 式の右辺の  $K$  に関する第 2 項の値はゼロに近づいていく。この極限的なケースで (6) 式に残されるのは  $Q$  と  $R$  の 2 変数と幾つかのパラメーターだけであり、この場合の  $R$  の大きさは図 2 における資源投入の漸近線を意味しており次式が成立する。

$$R_{\min} = \frac{Q/\gamma}{\alpha^{\sigma/(\sigma-1)}} \quad (7)$$

(b) のケースにおいて、 $K$  が増加し無限大に近づく時  $\sigma > 1$  のため (6) 式の右辺の  $K$  に関する第 2 項もまた無限大に近づいてゆく。かくしてある与えられた実質生産水準  $Q$  を満足する  $R$  の値はゼロに近づいていくことになる。このことは、自然資本と人工資本が長期において十分な代替可能関係を生みだすような  $\sigma > 1$  のケースにおいて、低エントロピー資源の投入量がどこまでも減少してゼロにまでいきつくことを意味している。CES 型生産関数の分析において、代替の弾力性  $\sigma > 1$  であるために自然資本の減少がどこまでも続いていき究極にはゼロになってしまうという事実こそ、CES 型生産関数が熱力学の第一、第二法則を満たさないという証拠にほかならない。換言すれば、自然資本の減少にミニマムな水準が存在せず、自然資本が無制限に減少していき長期的な実質生産水準の維持が人工資本の増加によってもはや実現不可能となる等生産量曲線のケースを含んでしまうのである。以上の理由から、CES 型生産関数の分析における  $\sigma > 1$  の条件は過度に楽観的で非現実的であると批判して、Dasgupta と Heal (1979) は CES 型と類似の生産関数によるこれまでの長期的な資源代替性に関する実証分析について警告を述べているのである。

しかしながら、もし (2) 式の左辺の  $Q$  の大きさが最終財消費をもたらすサー

ビスや厚生水準を示す何らかの尺度で測られている時にはこの CES 型生産関数の利用も妥当であろう。なぜならば、最終財の品質向上によって厚生水準を向上させたとしても、それを生みだす資源投入量は減少可能とさせることによって、生産水準の自然資本への経済的依存を減らすことができるからである。

この点に関しては以下の諸点の注意をしておく必要がある。先ず第 1 には、伝統的な CES 型生産関数の分析では資源投入コストを減らしながら如何に物的生産量を増加させるかという視点から研究がおこなわれ、焦点は厚生でなく物的生産量水準自体に向けられているのである。最終財の生産水準について考察された生産関数分析をそのまま生産過程が生みだすであろう厚生水準についての分析に転用することは必ずしも妥当ではないのである。

第 2 には、最終財消費によってもたらされるサービスや厚生水準を示す尺度として  $Q$  の大きさを定義し直すことは、 $Q > R$  且つ  $E > 1$  であることも認めることになるのであるが、これは多くの問題点をはらまずにはおかないのである。

先ず最初に、製造業中心の財貨生産から情報産業などが中心のサービス経済に産業構造が変化することによって、経済活動における資源集約度が大きく減少するという通常の主張に対して、P. Lawn は幻想にすぎないと批判する<sup>(7)</sup>。すなわち彼によれば、財貨はサービスを生みだす物的対象物であり、両者は決して独立した大きさではないとされる。財貨が消費されることによって財貨から生まれる厚生がサービスにほかならないのである。産業部門別の経済活動の資源集約度に差異が存在し、利用される物質、エネルギー 1 単位当りのサービス水準の大きさに違いがあるとしても、サービス産業主導経済を形成することによって人工資本に必要な資源・エネルギーが顕著に減少するわけではないのである。

さらに加えて、様々なサービス又は厚生が生みだされるための物質的基盤を考える時には、厚生水準の大きさを測られる生産量の生産関数分析においても、物的生産プロセスを支配する熱力学上の限界が考慮されなければならない。それ故に、最終財の生産と同じように生みだされるサービスの品質の限りない

(7) Lawn.P [1] 参照

向上を達成するとしても、投入資源単位当りの厚生が無制限に増大することはありえないのである。そして、このサービスの品質の向上が生みだされるケースについて、物理的制約を取り入れた適切な経済分析は、CES 型生産関数を用いておこなわれていないのである。

最後に、厚生水準の分析をおこなっていないという伝統的な生産関数分析は、生みだされた廃棄物の自浄作用と生命力を維持支援するという自然資本の働きを考える時、より根本的な分析の不十分性を示しているのである。たとえもし、低エントロピー資源投入の持続的な減少によって同一水準の経済的厚生が達成されとしても、自然資源の枯渇がおこれば上に述べた非経済的厚生のマイナスの結果を生み出すのである。この非経済的厚生のマイナスの大きさがプラスの経済的厚生を上まわってしまえば、全体の厚生水準は減少せざるをえない<sup>(8)</sup>。

このようにして、CES 型生産関数が自然資本のミニマム水準での制約という特性をとり入れた上でより現実的な分析技法になっていないという問題点を指摘する時、CES 型生産関数は  $\sigma < 1$  の場合の最小資源必要量を推計するケースに用いることができて、自然資本に対する人工資本の長期の潜在的代替可能性を決めるための分析手法としては不適切であると結論される。換言すれば、CES 型生産関数は物理学上解釈不可能なパラメーターを含んでおり熱力学の諸法則をふまえていないため、実現可能な生産関数の特性も満足しないのである。

## 6. バークストローム型生産関数の導入

かくして自然資本に対する人工資本の潜在的代替可能性の問題を分析するためには、これまでの CES 型ではない生産関数を取りあげねばならない。P. Lawn によれば、それはバークストローム型生産関数であり、 $Q$ ,  $K$ ,  $R$  の記号についてはこれまでと同じ内容を示し、 $\beta$  を新しい技術的パラメーターとすれば、次式のように表わされる。

---

(8) 「持続的経済厚生の指数」や「真の進歩の指数」の推計によってこうした現実が示唆されており、詳しくは、Lawn [2] Chapter6, 7 を参照。

$$Q(\beta, K, R) = [1 - \exp(-\beta \cdot K/R)]R \quad (8)$$

このバークストローム型生産関数（以下 BPF）がより実際的な生産関数として満たすべき条件を満足することは、以下のように容易に確かめることができる。

満たすべき第 1 の特性は、技術効率  $E$  が 1 より小さいことであるが、BPF における技術効率は次式で示される。

$$E = [1 - \exp(-\beta \cdot K/R)] \quad (9)$$

但し、 $E$  は実質生産力に体化されている物質・エネルギーを資源投入量  $R$  に体化されている物質・エネルギーに対比した時の比率である。 $\beta$  の値の大きさや、人工資本の資源投入に対する比率である  $K/R$  の大きさにかかわらず  $E$  の値は常に 1 より小さいことは容易に導かれ、かくして BPF は実現可能な生産関数の第 1 の特性を満足する。

さらに、 $\beta \cdot K/R$  の値が時間とともに増加する時、上式の技術効率  $E$  の値は熱力学上の限界  $E = 1$  に漸近的に近づいて増加していくことが導かれる。それ故、BPF は実現可能な生産関数の第 2 の特性を満足している。

第 3 の実現可能な生産関数の特性は、低エントロピー資源が生産プロセスの真の投入物となっていることであるが、これは上式で実質生産量  $Q$  が資源投入量  $R$  を乗数として掛けることによって示されていることから満足されている。

これに加えて、BPF はさらに以下の 2 つの特性を満たしている。まず第 1 には、人工資本の役割が生産関数についての技術効率  $E$  に影響を及ぼすものとして定式化されているため、BPF では人工資本  $K$  は直接の投入物ではなく、生産プロセスにおける資源変換作用要因として取り扱われていると考えられる。さらにまた第 2 には、BPF の技術効率  $E$  の定式化の中に人工資本の資源投入に対する比率  $\beta \cdot K/R$  を含ませることによって、BPF では人工資本を資源投入に依存した変数であるとして取り扱っていると解釈できるのである。技術効率が向上する通常のケースにおいては、資源投入  $R$  の増加に対しては人工資本  $K$  の増加が可能となることを意味している。この点は、これまでの生産関数分析にお



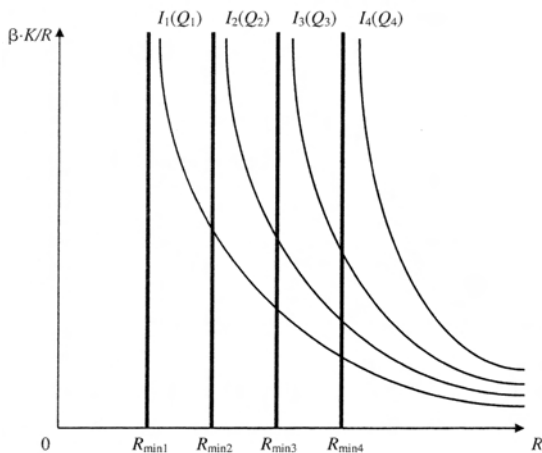


図 3. バークストローム型生産関数による等生産量曲線図

出所 文献〔2〕P.52

いて人工資本が外生変数として取り扱われていることを想起する時きわめてユニークな特性と言えよう。すなわち、人工資本を外生変数として取り扱ってしまえば、低エントロピー資源の追加的投入を伴わずに、あるいは更新可能資源の再生能力を超えることなく自然資本の枯渇に直面することもなしに、人工資本の増加が可能となるということを意味してしまうのである。

図 3 は、BPF の等生産量曲線を図示したものである。この図では、 $Q_1$  から  $Q_4$  までの 4 つの異った生産水準に対応した等生産量曲線  $I_1$  から  $I_4$  ままでが示されている。投入資源と人工資本の様々な組合せを示すそれぞれの等生産量曲線に対して、最低限必要な低エントロピー資源量を示す資源漸近線  $R_{\min 1}$  から  $R_{\min 4}$  ままでが同時に示されている。CES 型生産関数の場合とは異なり、BPF の等生産量曲線図においては、熱力学上実現不可能な資源と人工資本の組合せは全て除外される。

(9) 漸近線より左側には等生産量曲線は存在しないことに注意しておこう

ここで、実現可能となる代替可能性の範囲について検討するにあたって BPF における代替の弾力性  $\sigma$  を数式で導いておこう。

いま人工資本  $K$  から合成した作用を表わす新しい変数  $Z$  を導入し、 $Z = \beta \cdot K$  として (8) 式に代入すれば、

$$Q(Z, R) = [1 - \exp(-Z/R)]R \quad (10)$$

代替の弾力性の定義によって

$$\sigma = \frac{d(Z/R)}{d(MRTS_{RZ})} \cdot \frac{MRTS_{RZ}}{Z/R} \quad (11)$$

但し、 $MRTS_{RZ}$  は低エントロピー資源の投入と人工資本と技術作用の合成効果を示す変数  $Z$  との間の限界技術代替率を示している。それ故、

$$MRTS_{RZ} = Q_R / Q_Z \quad (12)$$

但し、

$Q_R$  = 低エントロピー資源投入の限界生産物

$Q_Z$  = 人工資本と技術作用双方の変化にもとづく限界生産物

であるから

$$Q_R = \partial Q / \partial R = 1 - (1 + Z/R)e^{-Z/R} \quad (13)$$

$$Q_Z = \partial Q / \partial Z = e^{-Z/R} \quad (14)$$

となり、これを (12) 式に代入して、

$$MRTS_{RZ} = \frac{1 - (1 + Z/R)e^{-Z/R}}{e^{-Z/R}} \quad (15)$$

$$= e^{Z/R} - 1 - Z/R \quad (16)$$

ここで単純化のため  $\mu = Z/R$  として、

$$MRTS_{RZ} = e^{\mu} - 1 - \mu \quad (17)$$

$$\therefore \frac{d(MRTS_{RZ})}{d(Z/R)} = e^{\mu} - 1 \quad (18)$$

これを  $\sigma$  の定義式に代入して、

$$\sigma = \frac{e^{\mu} - 1 - \mu}{(e^{\mu} - 1) \cdot \mu} \quad (19)$$

ここである範囲の  $\mu$  に対して  $\sigma < 1$  となり、 $\mu$  が  $\infty$  に近づく時  $\sigma$  の極限はゼロとなることが導かれる。

かくして、 $\mu$  の適当な値に対して  $\sigma < 1$  であるから自然資本と人工資本の間に代替関係よりもむしろ補完関係が存在することになり、また両資本の補完関係の程度は人工資本と投入資源の比率  $\mu$  が上昇する時  $\sigma \rightarrow 0$  となって強まっていくと考えられる。

これらの分析結果は、自然資本が減少していく長期において、技術進歩によっては  $\sigma < 1$  だから実質生産水準の維持が保たれないことを意味するとともに、代替の弾力性の値が次第にゼロに近づくために人工資本による自然資本の長期的代替可能性はより不十分にならざるをえないことを意味するのである。しかしながら短期において熱力学上の限界  $E = 1$  が到達されるまでの間は、実質生産力は代替可能性を実現する技術進歩のおかげである程度維持させられていくのである。

さらにまた、実質生産水準を維持するための追加的な人工資本投入が生み出す潜在的な可能性の問題は、単なる資本間代替問題にとどまらない問題をはらんでいる。これを P. Lawn 自身は、「目に見えない (implicit な) 代替問題」と呼んでいるのであるが、人工資本に体化されていく改良技術ノウハウによって生産過程で生まれる高エントロピー廃棄物が減らされるかのように思いこんでしまうことは、代替可能性に関する幻想を生みだしていくと批判している。かくしていずれにおいても、人工資本が自然資本に簡単に代替してとって変わるとは考えられないというのが BPF による P. Lawn の主張なのである。

図 4 は、人工資本と投入資源の比率  $Z$  が上昇していく時、人工資本と自然資本との補完関係の度合いがいかに増大するかを示したものである。

最初の時点で経済は点  $A$  にあり、そこで生産量  $Q_1$  は人工資本と投入資源の組合せ  $(Z_1, R_1)$  で示される状態にあるとする。この点  $A$  は等生産量曲線  $I_1$  上に

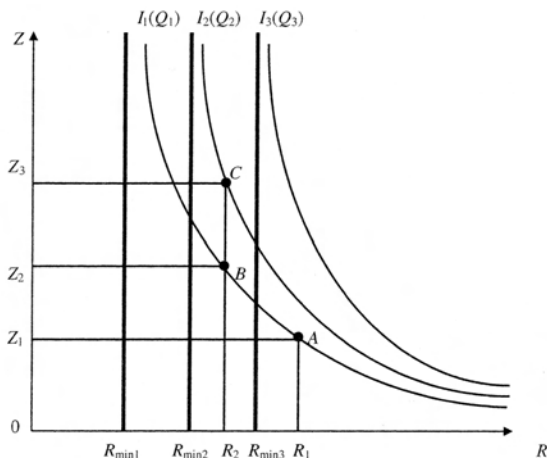


図 4. 自然資本と人工資本間の補完関係の増加

出所 文献〔2〕P.55

あるものとする。

いま、低エントロピー資源投入量が自然資源の枯渇といった環境変化を反映して  $R_2$  まで減少した時には、同一生産量水準  $Q_1$  が維持されるためには人工資本の作用は  $Z_2$  まで増加しなければならず、経済は等生産量曲線  $I_1$  ( $Z_2$ ,  $R_2$ ) で示される点  $B$  に移動すると考えられる。しかしながら、こうして点  $A$  から点  $B$  に移動して同一生産量水準が維持しえても、新しい経済状態はより投入資源の漸近線  $R_{\min 1}$  により近づいた結果になっていると考えられる。資源投入量が減少すればする程、熱力学上の限界を示す漸近線に近づいてしまうのである。これは経済生産活動の拡大と共に高エントロピー廃棄物のより一層の削減が難しくなると考えられるためであり、資源間の代替可能性もより困難となってより補完性を高める状態に近づいていかざるをえないためである。

点  $B$  に移動した後では、一層の技術進歩が生まれることによって高エントロピー廃棄物の発生が減少し、この時人工資本の作用は  $Z_3$  の大きさになる。かくして経済水準は、より高い等生産量水準  $I_2$  に到達するのである。経済状態は、今

や点  $C$  までさらに移動して、人工資本と投入資源の組合せは  $(Z_3, R_2)$  で示される生産水準  $Q_2$  をもたらすのである。

この時注目されるべき点は、より高い等生産量曲線  $I_2$  が実現されているにもかかわらず、経済状態は新しい投入資源の漸近線に近づいていることである。即ち、点  $C$  では点  $B$  における元の漸近線  $R_{\min 1}$  までの水平距離よりもより新しい漸近線  $R_{\min 2}$  までの水平距離が短くなっており、これは生産拡大が進むとともに漸近線が右方向へシフトするのである。これは、人工資本と投入資源の比率である  $Z$  が増大する時、それらの代替の弾力性  $\sigma$  がゼロに近づいていくことを図示しているのである。かくして、資源投入が減少する程人工資本の役割は大きくなると共に困難ともなるのである。

これまでの分析においては、自然資本による資源提供機能の役割についてのみ焦点をあわせてきたのであるが、しかしながら自然資本にはそれ以外に人工資本の真似のできない廃棄物自浄機能や生命支援機能がそなわっていると考えられる。これらの諸機能を総合的に考慮すれば、人工資本と自然資本は代替的でなくより一層補完的關係を持っていると考えなければならない。こうした自然資本の真似の出来ない機能こそ、自然資源の経済的利用可能性の次元をこえた今日の環境問題をもたらしているのである。

## 7. 新しい自然資源政策を求めて

人工資本と自然資本が補完的關係にあると考える P. Lawn のこれまでの分析結果を前提とすれば、どのような自然資源に対する政策的含意がもたらされるかについてふれておこう。これは、図2において経済システムが急速に、あるいはゆっくりと自然資本全体の最低必要水準  $R_{\min}$  に近づく時に起こりうる問題を考えることにほかならない。もしゆっくりと近づくのであれば、潜在的な熱力学上の制約が効果をあらわすまでに数千年も要するのであろうから、自然資本ストックの減少に関心を持ったり騒ぐことは不必要のように思われる。しかし、この楽観論は以下の理由で正しくない。

第1に、何度もふれたように自然資本は人工資本に真似のできない独自で不可欠なサービスを提供するのである。このサービスを維持するために必要な自然資本が多い程、漸近線  $R_{\min}$  から遠くはなれて望ましい自然環境にあると考えられるのである。

第2に、資源制約の漸近線に実際にどれくらい近づいているかについて私達はほとんど知ることができないと思われる。生態圏は高度に複雑なシステムであり、事前には知りえないようなカタストロフ的な変化を潜在的に含んでいよう。とりわけ、現存する自然資本とその多様性をもつフィードバック作用の破壊がもたらす変化はその一例なのである。それ故、自然資本の減少は、全体的な資源制約の終局点に急速に近づいてしまうような生態圏の破局という危険性を常にはらんでいると考えておかねばならないのである。

第3に、人工資本と自然資本の補完関係という視点から考えると、とりわけ私達は将来世代に十分な自然資本を残す道義的責任を負っていると考えられるのである。自然環境の将来価値を割りびいて考えるという経済的思考は、現在世代には無関係であっても自然資源の将来的枯渇をもたらしてしまうかもしれないのである。現在世代の主観的欲求は将来世代が持つであろう適切な自然資本に対する欲求を上まわっているべきかどうかは、まさに今日の最重要な課題なのである。現在の必要が将来の必要をうわまわっているべきだという考えに反対する人はきわめて少ないかもしれない。そして、現在世代の主観的欲求にくらべると将来の必要は無視できるという人も同じように少ないであろう。

#### (a) 「強い持続可能性」と自然資源対策

自然資源の保全政策には2つのものが区別されている。自然資本を手つかずのまゝ残して保全をはかるという資源政策は、通常「強い持続可能性」の政策と呼ばれる。これに対して、自然資本と人工資本との結合したストックを維持すれば十分であるという政策——この政策は明らかに人工資本が自然資本に対して代替可能であるという仮説を前提としているのであるが——は、「弱い持続

可能性」の政策と呼ばれている。エコロジー経済学にとっては残念なことであるのだが、「強い持続可能性」の政策は言うは安く行うは難しいという性格をもっている。この点については次の3点に注意を払う必要がある。

第1に、グローバルなレベルでの自然資本の制約とローカルな一国レベルでのその制約とが必ずしも表面的に直結しないことである。資源の国際貿易を考えるならば、この点は明白であろう。ある一国が自然資本を枯渇させたようにみえても、自然資本フローの他国からの輸入に依存することによって資源制約 $R_{\min}$ を維持することができるからである。もちろん言うまでもなく、輸入による持続可能性の維持は、最善でも資源の経済的利用可能性についてのみ成立するだけであり、自然資本の持つ生命支援機能については成立しないという限界を持っている。また自然資本の輸出国にとっても、自然資本の輸入国に供給する資源量については何らかの制約の下にあると考えられるため、一国の政策担当者が自国の社会経済プロセスにとって究極の投入物である自然資本の枯渇や産出物の自浄能力の消失についてふりかえることなく、もっぱら他国からの自然資本の輸入に依存してしまうのは無責任しごくであると P. Lawn は批判している。

第2に、自然資本の維持保全という言葉で実際に何が意味されているのかという問題がある。自然資本の所与の量が手つかずのまま維持されるという意味でもあるし、またより具体的に自然資本の何らかの機能が保全されるという意味の場合もある。一国の森林資源の数量が可能なかぎり手つかずのまま保たれるが、その内容が発育の遅い原生林から発育の速い木材生産へと転換されるケースを想定すれば、その問題点は明らかであろう。この場合、自然資本の資源提供機能は増大するとしても、生命支援機能が消滅してしまうかもしれないのである。1つの機能のプラスで他の機能のマイナスを単純に埋め合わせることができるとは考えられない。原生林として持っていた生命支援機能は、人工林への転換が進むにつれて木材生産による追加的資源供給機能を限界的に上まわっていくと考えられる。こうして一国の自然資本の提供する様々なサービスについ



て綿密に分類した上で、これらを量的にも質的にも維持保全していくことが不可欠となるのである。

第3に、自然資本の中における非更新性資源の特性が注意されねばならない。非更新性の資源は、手つかずのまゝ維持保全されるということは本来不可能である。新しく資源が発見されれば既存資源の枯渇を相殺しうる可能性が開けるのであるが、その資源に対する需要が増加していく時、いずれ新しく発見された新資源量を上まわってその資源のストックが減少するであろう。それ故、自然資本の全体のストックが手つかずで維持保全されうするためには、追加的な更新可能資源が継続して開拓されていくか、あるいは既存の非更新性資源についての生産性が向上することによって既存ストックの減少が相殺されなければならない。かくして非更新性資源の利用においても、完全な枯渇に近いかもしれないという認識の下でその保全につとめていかなければならないのである。

## (b)「強い持続可能性」とマクロ経済政策

経済学のロジックによれば、マクロ経済政策は短期において稀少な生産要素の生産性を最大化し、長期において稀少な生産要素の供給増加に向けた投資をおこなうことを目的としなければならない。自然資本が急速に制限的な供給となる今日においては、自然資本に対する積極的投資が推進されるような制度的デザインが不可欠である。各国で推進されつゝある「エコロジー税制による改革」(ETR)はこの要請に応えようとする試みの一つである。これは、環境や社会に「良いモノや活動」(＝グッツ)に対しては税金を下げたり、免除したり、補助金をだしたりしてどんどん推進し、反対に環境や社会に「悪いモノや活動」(＝バズ)に対しては重い税金をかけてその排出や活動を抑制していこうとする試みであり、これまでの税制からの大転換であるといわれている。これまでの税制の仕組みでは、労働や人件費(グッツ)に対する税は高く、資源やエネルギーの使用(バズ)に対する税が低かったため、「天然資源を使いすぎて人間の労働力をできるだけ節約する」方向が目指されてきたのである。その結果、

「天然資源を使いすぎ、人間の労働力は十分に使うとはいえない」現状がもたらされたとして、今後は生産性重視から資源効率性重視へと ETR によって転換しつつあるのである。

ただ優れた政策としての ETR に対しても、「強い持続可能性」の条件を満足するか否かについて論争がおこなわれている。多くのエコロジー経済学者の主張によれば、環境税と名付けられたピグー税は単位生産当りの資源集約度を減少させ技術効率  $E$  を向上させてくれるはするが、ニーズの拡大によって自然資本そのものを維持保全してくれはしないというものであった。この税制によって、生産効率の向上がもたらされ資源効率も改善されても、多くの財貨を消費したいという欲望にもとづく実質生産高水準の増大によって打ち消されてしまう可能性をはらんでいるのである。このような効率性の向上の実現がかえって欲望拡大と生産の増大をもたらしてしまう現象は、「ジェボンズの逆説」と呼ばれるが、この時には自然資本ストックの不可避的減少を生みだしてしまうのである。そこで改めてエコロジー経済学者は、資源の使用・取引量に全体的許可量の制約を組み込んだ ETR の枠組みを提唱している。取引許可量制限の設定によって、資源のスループットを自然資本の再生能力以下の伸び率に抑制して強い持続可能性の実現に近づけようとするのである。

更にこれ以外にもマクロの国民所得会計との関連では、E. Serafy による資源枯渇をひかえた非更新可能資源ストックを適切な所得フローを生み出す経済的資産として評価しようとする試みや、国民所得会計の「グリーン化」の様々な試みがあるが、ここでは割愛しておく。

## 8. むすび

これまで、エコロジー経済学者 P. Lawn の論文を詳しく紹介しながら、自然資本は人工資本にとって（代替物でなく）補完物であるという彼の主張を吟味してきた。

減少しつつある自然資本に対して代替可能となる人工資本の役割を検討する

ための CES 型生産関数による経済分析は、自然資本のミニマムは最低水準の必要性を考慮しないため、熱力学の 2 法則を満たさないという大きな欠陥を持っていることが示された。

この CES 型生産関数にかわって Bergstrom 型の生産関数が導入紹介された。この関数によれば、2 つの資本間の代替弾力性が 1 より小さく代替可能性も小さいだけでなく、自然資本の枯渇が進み人工資本が増大しても代替の弾力性はゼロに近づいていき、それらの補完関係が強まっていくのである。

それ故、自然資本が人工資本と補完関係にあり、長期的にその関係が強まっていくという P. Lawn の主張を是認するならば、自然資本を出来るだけ手つかずで維持保全しなければならないという「強い持続可能性」の立場にもとづく政策研究が推し進められなければならないのである。

## 参考文献

- [1] Lawn, P (2001) 'Goods and services and the dematerialization fallacy'. International Journal of Services, Technology and Management.2
- [2] Lawn, P (2007) Frontier Issues in Ecological Economics. Edward Elgar.
- [3] Malthus, T (1798) An Essay on the Principles of Population. 「人口の原理」岩波文庫。
- [4] Meadows, D. H. et. al (eds) (1972) The Limit to Growth. 「成長の限界」ダイヤモンド社。
- [5] 拙稿 (2008) 「環境制約を取り入れたマクロ経済モデルの理論的検討——P. Law モデルについて」『経済理論』343. 和歌山大学経済学会。
- [6] Solow, R. (1974) 'The economics of resources or the resources of economics' Ame. Eco. Rev. 64.